

論文

音響探査法を用いた 軟性容器内容物の凝集状態の可視化の研究

Study on visualization of a soft container content condensed state using
non-contact acoustic inspection method

川井 重弥¹・中川 裕²・杉本 恒美*

桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

(2020年3月14日 受理)

I. はじめに

飲料業界での容器は多種存在している。金属製の缶容器、樹脂を用いたPET（ポリエチレンテレフタレート）、PP（ポリプロピレン）、PE（ポリエチレン）製容器、紙製容器などがあげられる。内容物が腐敗した際に、ガスが発生し容器が膨張すること、または内容物が腐敗するがガスが発生しないフラットサワーと呼ばれる内容物粘度が変化する場合、また内容物に離水が発生する場合や凝集する場合などがある。特に内容物がフラットサワーと呼ばれる状態にあっては容器形状が変化しない状態であり、検査が困難である。そこで本研究において、非破壊で検査することを目的に、音響探査法を用いた内容物の凝集状態の可視化を可能な方法を検討する。

飲料容器において、内容物の腐敗があってはならない。通常は容器の勘合状態や製造工程に於ける殺菌状態を抜き取り検査で監視し工程上の品質保証を行っている。しかし容器の密封不良や殺菌工程での不具合があった場

合、内容物が腐敗して不良品になってしまう。腐敗は時間の経過とともに進み、充填直後では検査が出来ず、菌の発生時間の経過後検査を行うことになる。よって、経過時間の短縮化で検査が出来ることが望まれる。今回は非破壊による音響探査法を用いた検査で、内容物の腐敗があったと仮定されるフラットサワー状態で内容物の凝集または、内容物が元々粘性の高い内容物で内容物の凝集状態を容器の外側から可視化することを可能にする方法を検討した。

現在の評価方法としては、容器を開封破壊した状態で内容物の状態測定する方法を用いている。測定器は粘度測定¹⁾を行う精密回転粘度計や、テクスチャー（かたさ、もろさ、弾力、密着力）を測定するクリープメータを用いた2軸物性評価システムを使用して評価している。

一方、実際の非破壊で行う場合の検査方法として、X線の透過映像²⁾により容器内部の状態を透過として捕らえ内容物の凝集状態を測定する方法がある。X線は現在では高価な機種としてはX線CT装置があげられる。

* SUGIMOTO Tsuneyoshi: Professor, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama 225-8503, Japan

¹ KAWAI Shigeya: Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

² NAKAGAWA Yutaka: Researcher, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

ただし、実用域の測定としてはサブミリ程度の状態を非破壊で測定できる状態である。そこで、今回我々の研究室に於いては、音波照射加振とレーザドップラ振動計を用いた非接触音響探査法³⁻¹⁸⁾により、内容物の凝集状態を非接触非破壊で可視化する方法の研究を行った。

II. 非接触音響探査法

非接触音響探査法概念図を図1に示す。非破壊非接触で検査を行う方法として、スピーカーで対象の軟性容器の側面部に音波照射加振を行い励振させる。軟性容器の側面の表面をレーザドップラ振動計 (LDV) で振動速度を計測し近接することなく検査を行う。内容物の凝集状態を測定するに当たり、軟性容器の側面は数カ所の測定点を測定する。

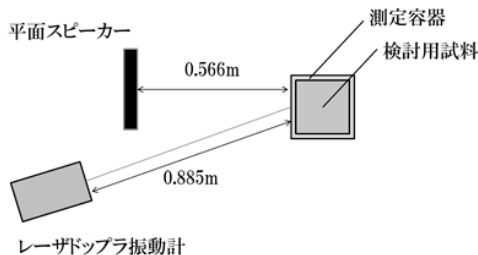


図1 非接触音響探査法概念図
セットアップ図 (上面図)

軟性容器側面に対して加振が行われた際に、その計測対象面内部で内容物に振動が伝搬され反射波が容器側面に発生する。その軟性容器の側面は、内容物に密着しているため、軟性容器側面はたわみ振動が励起される。これにより内容物の凝集による軟性容器側面に振動速度に差異が生じるため、凝集状態を振動速度分布として特定することが可能になる。音波加振では接触型の直接加振に比べて、非常に小さなエネルギーしか対象に与えることが出来ない。そのため、ただ音波を当てるだけでは容器側面を励振させることは難しい。そこで重要になるのは、対象の共振現象を利

用するという方法である。単純支持された正方形の場合のたわみ振動の定義式を(1)式に示す¹⁹⁾。

$$fr = \frac{19.74h}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad \text{.....(1)}$$

(1) 式において、 fr は共振周波数、 h は軟性容器側面の壁厚み、 a は測定点の半径、 E はヤング率、 ρ は密度、 ν はポアソン比を表している。

音響加振時にはこれらの共振周波数範囲の音波を放射することで、計測対象面でたわみ共振を励起させ内容物凝集部を検出することが可能になるのである。また、音響加振を行う際に重要なことがもう一つ存在している。それはスピーカーから放射されている音圧である。前述した様に非接触音響探査法で使用している音波のエネルギーは微弱であるため、ある程度音圧を与える必要がある。これは、軟性容器に関する今までの研究結果から検査対象面で 95 ~ 100 dB 程度の音圧が必要であることが確認されている。非接触音響探査法は、この様に音波を用いて計測対象でたわみ共振を励起させ、それにより発生した振動分布の差異を LDV により計測し、欠陥部を検出する手法である。本手法の利点としては、音響加振と LDV を用いて計測を行うため、容器加振と測定を非接触非破壊で長距離から計測を行うことができ、定量的な検査も可能である点などが挙げられる。

III. 実験方法

図2に実験セットアップを示す。実験に使用した4種類の試験体の内容物の違いを表1に、各内容物の粘度とせん断特性性を図3に示す(以降 No.1 ~ No.4 と呼称)。試験体は No.1 の内容物を基準に、No.2 ~ No.4 は粘度がほぼ同等で、凝集状態が異なるものである。内容物は測定用の軟性容器に約 400 ml 充填し、測定に用いた。測定用軟性容器

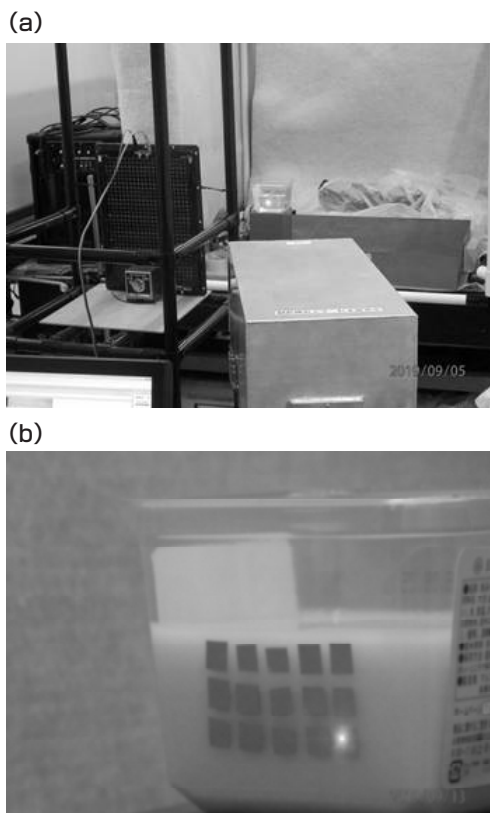


図2 測定実験セットアップ
(a) 実験風景 (b) 測定容器と反射シール

表1 内容物種類

内容物種類	No.1	No.2	No.3	No.4
増粘剤	ジェランガム			
	0.1%	0.15%	0.15%	0.15%
カルシウム塩	なし	なし	0.22%	0.27%
外観	分離凝集無し	分離凝集無し	タンパク凝集(細かい)分離状態	タンパク凝集(粗い)分離状態底部に沈殿がある
低粘度領域 (mPa・s)	8	10 ※低せん断、高せん断領域では、ほぼ等しい		
高粘度領域 (mPa・s)	1000	7000 ※低せん断、高せん断領域では、ほぼ等しい		

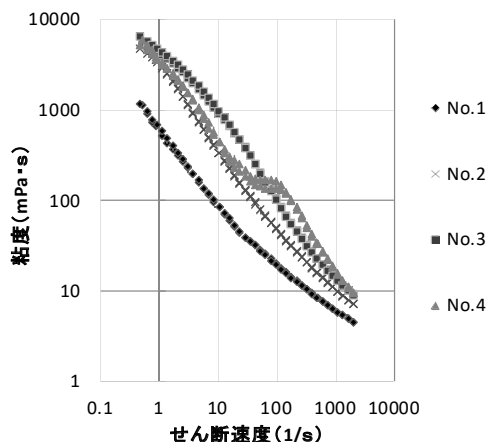


図3 粘度とせん断特性

は市販の PS (ポリスチレン) 容器を使用した (壁面の厚みは平均 $250\ \mu\text{m}$)。また、試料は測定前日に冷蔵庫から出し、測定時に液温が室温に近い状態となるようにした。測定時の室温の平均温度は 23°C である。試料が充填された測定容器の正面に音源およびスキニング振動計 (SLDV: Scanning LDV) を設置し、測定を行った。

今回は容器内部が可視化出来るように、透明容器を用いている。そのため、容器側面からのレーザ光の反射を利用した測定を円滑にするために、容器側面にある各測定点に反射シールを張り付けている。反射シールの中心点間の距離は約 $1\ \text{cm}$ である。使用した機器は平面スピーカー (FPS Inc, FPS2030) と SLDV (Polytec Corp, PSV400-H4) である。試験体からの距離はそれぞれ約 $0.566\ \text{m}$ と $0.885\ \text{m}$ である。

測定に使用した音波はトーンバースト波を使用した。図4に送信波形例を示す。音波照射による加振力を得るためにパルス継続時間を $5\ \text{msec}$ とした。加振周波数範囲内で見落としのない測定を行うために、バースト波の周波数は離散的に $25\ \text{Hz}$ 毎 (帯域幅は $50\ \text{Hz}$) に変化させている。今回の加振周波数範囲は、軟性容器側面部の共振周波数は $325\ \text{Hz}$ にあるので、周波数範囲は $100\ \text{Hz} \sim 1\ \text{kHz}$ で設定した。また、減衰特性を明確に

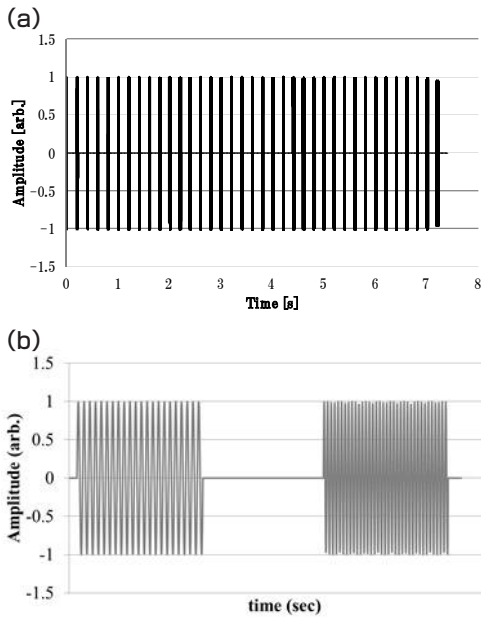


図4 送信波形
(a) 受信波形 (b) 振動速度スペクトラム

するために、パルス波のインターバル時間は 200 msec、パルス幅 20 msec としている。波形の長さは 7.4 sec である。計測対象物近傍付近の音波の最大音圧は 97.5 dB とした。測定時の加算平均回数は 5 回とし、周波数フィルターとしては遮断周波数 50 Hz のハイパスフィルターを使用した。

IV. 測定結果

図5は325 Hzの音波で測定容器が振動した時のそれぞれの試験体 No.1 ~ No.4 の振動速度波形である。また、図6に音波加振後の時間帯から算出された振動エネルギーを示す。図7にフーリエ変換後の振動速度スペクトル例および積分区間の例を示す。振動エネルギーは任意の周波数範囲の振幅の2乗を積分することにより得ることができる。

図5および図6より内容物種類 No.1 ~ No.4 (凝集状態の比較) は1つの点での比較であるが、No.1 ~ No.3は凝集状態が高くなるにつれて振動しにくくなる傾向が確認され

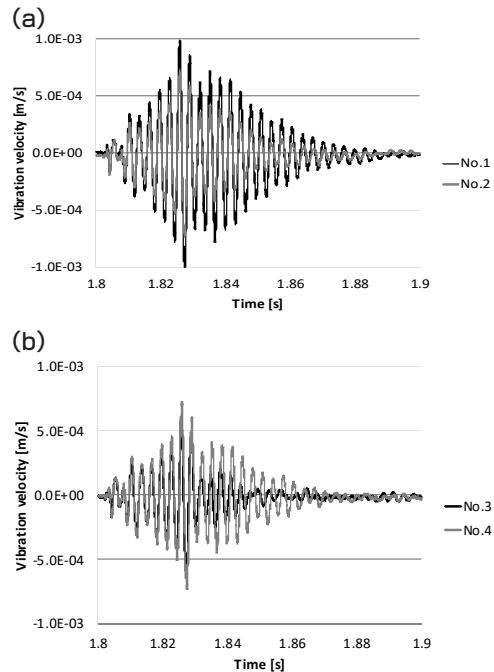


図5 振動速度波形
(a) No.1, No.2 (b) No.3, No.4

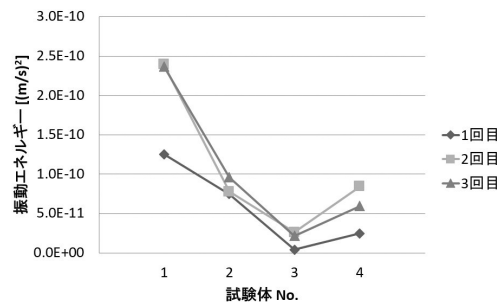


図6 各内容物と振動エネルギー

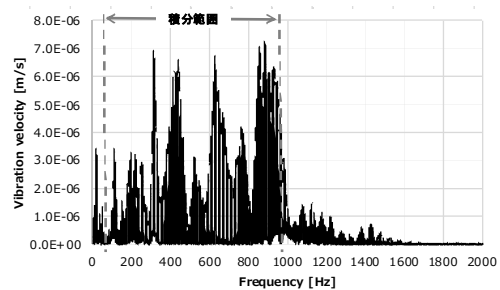


図7 振動速度時間波形のフーリエ変換特性

た。しかしながら、No.4 は No.3 よりも振動しやすい傾向を示した。これは No.4 は液体と凝集物が明らかに分離（離水：粘度の低い液体に凝集物が浮遊している状態）しているため、測定面付近に粘度の低い液体があり No.3 よりも振動しやすくなったと考えられる。

V. まとめ

試験体 No.1 ～ No.4（凝集状態の比較）は 1 点での比較となったが、No.1 ～ No.3 は凝集状態が高くなるにつれて振動しにくくなる傾向が確認された。No.4 は No.3 よりも振動しやすい傾向を示したが、分離した内容物に凝集物が浮遊している状態で測定したため、測定点付近の粘度の低い液体の影響を受けた事で振動しやすくなったと考察できる。

今回の凝集状態の異なる内容物は総じて振動速度の差が得られており、軟性容器の外側から、非接触非破壊で内容物の凝集状態を可視化することが可能であった。このことは、工程検査において本手法による非破壊検査が実施可能であることを意味しており、将来的に品質管理手法の一つとして、本手法が用いられる可能性があると思われる。

【参考文献】

- 1) JIS Z803: 2011 液体の粘度測定方法
- 2) 小林りか, 日本大学 石黒貴寛, 旭松食品 川井清司, 広島大学大学院 尾関亜海, 東京海洋大学 “凍り豆腐の固形部分におけるタンパク質凝集体生成過程の反射光 CT を用いた半定量的分析” 2016 年度後期実施課題 産業新分野支援課題 公益財団法人高輝度光科学研究センター 2016B1792 pp.214-217
- 3) R. Akamatsu and T. Sugimoto: Acoust. Soc. Jpn. Spring. Meet. 3-8-7 (2011) p. 1569 [in Japanese].
- 4) N. Utagawa, R. Akamatsu and T. Sugimoto: Jpn. Soc. Civil. Eng. 66 (2011) p.1569 [in Japanese].
- 5) N. Utagawa, R. Akamatsu and T. Sugimoto: Proc. of the 10th Int. Symp. on New Tech. for USMCA (2011) p.104.
- 6) T. Sugimoto, R. Akamatsu, N. Utagawa and S. Tsujino: IEEE Int. Ultrasonics Symp., (2011), p.744.
- 7) R. Akamatsu, T. Sugimoto, H. Kawasaki, N. Utagawa and S. Tsujino: Proc. of the 10th SEGJ Int. Symp. (2011) p.84.
- 8) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, and K. Katakura, Jpn. J. Appl. Phys., 52, 07HC12, (2013).
- 9) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura: IEEE Int. Ultrasonics Symp., (2012), p.94.
- 10) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura: IEEE Int. Ultrasonics Symp., (2013), p.1303.
- 11) K. Katakura, R. Akamatsu, T. Sugimoto, and N. Utagawa: Jpn. J. Appl. Phys. 53, 07KC15 (2014).
- 12) K. Sugimoto, R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, C. Kuroda and K. Katakura, JJAP, 54, 07HC15, (2015).
- 13) T. Sugimoto, K. Sugimoto, N. Kosuge, N. Utagawa and K. Katakura, JJAP, .56, 07JC10, (2017).
- 14) K. Sugimoto, T. Sugimoto, N. Utagawa, C. Kuroda, Jpn. J. Appl. Phys., 58, SGG15, (2019).
- 15) 川井重弥、中川裕、杉本恒美：“非接触音響探査法を用いた軟性容器の内部腐敗ガス検出に関する研究” 日本包装学会誌 Vol.27 No.6 pp.409-423, (2018)
- 16) 川井重弥、中川裕、杉本恒美：“非接触音響探査法を用いた飲料用軟性容器の内容物粘性液体測定に関する研究” 日本包装学会誌 Vol.28 No.3 pp.187-198, (2019)
- 17) 杉本恒美、中川裕、川井重弥、特願 2017-126317 “非接触検査システム”

- 18) 杉本恒美、中川裕、川井重弥、嶋隆志、特願 2020-021473 “非接触検査システム、非接触検査装置及び非接触検査方法”
- 19) A.W. Leissa: Vibration of plates, NASA, SP-160, U.S. Government Printing Office, Washington DC, p.9, (1964).